

大阪大学工学部 学生員 ○小岩 祐樹 大阪大学大学院 正会員 谷本 親伯
 大阪大学大学院 学生員 田辺 充祥 ハイテック(株) 舩屋 直

1. はじめに 歴史的建造物である中国の敦煌莫高窟では、窟内の壁面に塩類が析出することによる壁画の剥離、壁面の崩壊が問題となっている。塩類は溶解した状態で水分に伴い移動し壁面に析出するが、その水分供給源として過去に起こった洪水や雨水が要因となっている。しかし、それ以外にも恒常的な地下からの水分供給が考えられる。また塩類の状態を考える上で、塩類の潮解現象に着目する。潮解とは、塩類が空気中の水蒸気を吸収してその水に溶ける現象であり、塩類の飽和溶液の平衡湿度よりも高い湿度環境下で起こる。このように、塩類は高湿度環境下で吸湿して溶け、可動なものになることに着目すると、塩類の潮解と地下からの蒸発の両作用により、蒸発方向に塩類が移動する可能性がある。そこで、地下からの蒸発作用に伴う塩類の移動性を、地盤のわずかな差異を反映する比抵抗法を用いた室内透湿実験により考察を行った。

2. 実験概要 現地地盤の模擬として供試体には粒径が $0.11 \sim 0.425\text{mm}$ の範囲である豊浦標準砂を用いた。また、今回は塩類の模擬として現地析出塩のうち析出割合の多かった NaCl (塩化ナトリウム) を用いた。現地地盤において大きな粒子自体には間隙がなく、間隙の多くが細粒子部にあることに着目し、細粒子を豊浦標準砂で模擬し、間隙と豊浦標準砂を合わせた体積あたりの塩量の割合を現地礫岩より求められたものから設定し、現地地盤を模擬した。今回の室内透湿実験で使用した装置を写真1に示す。現地地盤において深さ 20cm 以深では相対湿度 75% 以上の NaCl 潮解域であることから、装置両端を相対湿度 100% に近い高湿度条件下に設定し、水蒸気移動の存在する地盤内の塩類の挙動を比抵抗測定により追った。左方からエアープンプにより供試体に相対湿度 100% に近い高湿度の空気を送り込み、右方へ透過させる。左方の水蒸気の供給側から順に No.1, No.2, ..., No.11 と環状に設置した電極部の比抵抗変化を測定した。供試体には NaCl 量を上記の同条件に設定し、 NaCl が常温で全て溶解する含水状態、及び間隙水量をゼロとしたものを用いた。

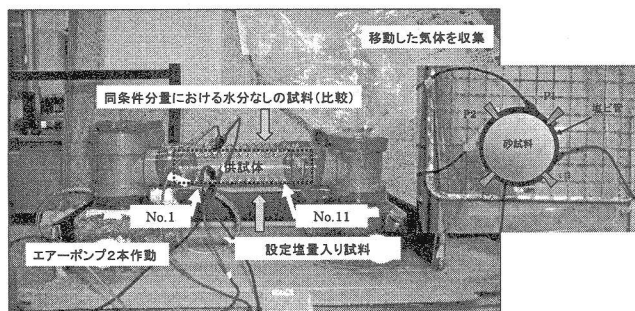


写真1 透湿実験装置

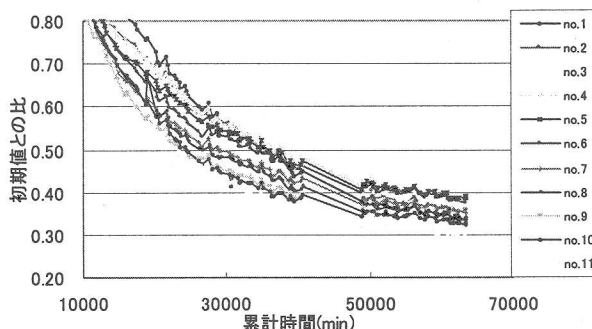


図1 初期設定含水供試体比抵抗変化・初期値との比

3. 実験結果に対する考察 図1に実験結果を示す。これは各電極部の比抵抗変化を測定初期値との比で表したものである。まずこの図から、全ての電極において、比抵抗が一様に低下していることから、地盤中に存在する塩類は移動する水蒸気を吸収することがわかる。地下水面から地表面まで水蒸気が蒸発作用により透過していく過程で、地盤内の相対湿度

が75%以上であれば、塩類が水分を吸収することは十分に考えられることになる。

さらに、以下のことがわかる。

- ① 水蒸気脱気側である No.9・10・11 では比抵抗低下率が高い
- ② 装置中央部である No.3～No.8 では比抵抗低下率が低い
- ③ 水蒸気供給側である No.1・2 では水蒸気脱気側と比べると比抵抗低下率は低いものの、装置中央部よりも比抵抗低下率が高い

①、②より高湿度の空気が流れていく方向に比抵抗低下率が高くなっていることから、潮解した NaCl が移動した可能性がある。しかし③より、湿度の高い空気が供給される箇所に近い電極では比較的比抵抗低下率が低かったことから、供試体中に間隙水量の差異が生じていると考えられる。なお、比較実験として行った初期設定を NaCl 既定量、間隙無水とした供試体を用いた測定では、湿度の高い空気を送った側から順に比抵抗低下率が低いという結果が得られた。

そこで実際に供試体中の物性がどのように変化しているかを調べるため、供試体を5つに分割し、供試体中の塩量、含水量を測定した。表1が分割後の各部の物性値である。塩分含有率に関しては、水蒸気脱気側の方が水分供給側よりも高いという明らかな違いが生じていた。

供試体は均一に攪拌して実験装置に詰め、締め固めたため、初期分布の差ではなく移動によるものであると考えられる。また含水量に関しては、分割して採取した豊浦標準砂の質量あたりの間隙水量を測定し、各集合部の比較を行った。表1から、湿度の高い空気が供給される集合①では全体よりも水分飽和度が比較的高いことがわかる。このことから、NaCl 量が減少している水蒸気供給側の比抵抗低下率が中央部よりもやや低く測定された理由が、含水量の差異によるものであったことがいえる。

表1 初期設定含水供試体分割後各物性値

集合	電極no.	採取塩平均値(g)	採取塩(g)	間隙水量(g)	間隙比	砂(dry)(g)	間隙水量/砂(dry)	塩分含有率(%)
①	1	1.35	1.14	8.83	0.117	65.42	0.135	1.71
②	2・3・4	0.94	0.90	5.98	0.114	45.72	0.131	1.93
③	5・6・7	1.22	1.17	7.18	0.105	59.97	0.120	1.91
④	8・9・10	1.12	1.16	6.76	0.108	54.44	0.124	2.09
⑤	11	1.46	1.72	8.97	0.110	70.92	0.126	2.37
全体量(g)		6.09	6.09	37.72	0.111	296.47	0.127	2.01

表2 初期設定無水供試体分割後各物性値

集合	電極no.	採取塩平均値(g)	採取塩(g)	間隙水量(g)	間隙比	砂(dry)(g)	間隙水量/砂(dry)	塩分含有率(%)
①	1	1.37	0.92	7.44	0.094	70.69	0.105	1.28
②	2・3・4	1.09	1.00	5.93	0.095	55.78	0.106	1.76
③	5・6・7	1.20	1.26	6.93	0.100	61.30	0.113	2.01
④	8・9・10	0.60	0.81	3.66	0.106	30.09	0.122	2.62
⑤	11	1.25	1.51	7.19	0.100	63.37	0.113	2.33
全体量(g)		5.50	5.50	31.15	0.098	297.06	0.105	1.82

表2は、初期設定を NaCl 既定量、間隙無水とした供試体を用いた測定後の各部の物性値である。この測定では、比抵抗低下率が水蒸気脱気側の近づくほど高くなった。塩分含有率も水蒸気の流れの方向へと大きくなっておりで明確な違いが現れている。これらの分割後の結果より、水蒸気の移動に伴い塩類が移動したことが確かめられた。

本実験より、水蒸気の移動に伴い塩類が固体から溶液へと状態変化し、吸湿・蒸発の両作用の繰り返しにより、蒸発方向へ塩類が移動していくことが把握できた。

4. まとめ 過去に起こった洪水や雨水といった水分供給以外にも、地下からの水分供給という恒常的な水分供給の可能性を考えた。そこで水蒸気の移動に着目して行った実験から、以下のことを考察する。

- ・高湿度空気を透過させると、供試体中の NaCl はその空気から水分を吸収する
- ・供試体中の潮解した NaCl は、高湿度空気の移動の方向に移動する

すなわち、敦煌莫高窟周辺地盤内において、この実験で模擬したような相対湿度 100%近い高湿度環境下では、地下水からの水分の蒸発によって塩類が移動する可能性がある。